

Членова А. А., Курляндская Г. В., Волчков С. О.,  
Лепаловский В. Н., Свалов А. В.  
*Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*

## ГИГАНТСКИЙ МАГНИТНЫЙ ИМПЕДАНС МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР С ОСОБЕННОСТЯМИ СИММЕТРИИ

*В данной работе были исследованы магнитные свойства и магнитный импеданс полос со слоистой структурой  $[\text{FeNi/Cu}]_x/\text{FeNi/Cu}/[\text{FeNi/Cu}]_x/\text{FeNi}$  и  $[\text{FeNi/Ti}]_x/\text{FeNi/Cu}/[\text{FeNi/Ti}]_x/\text{FeNi}$  при варьировании толщины магнитных суб-слоев FeNi. Максимальные значения МИ отношений для структур с прослойками меди составили 105 % и для структур с прослойками титана 170 %. Было установлено, что толщина субслоев FeNi влияет на формирование МИ отклика пленочных структур.*

**Ключевые слова:** магнитный импеданс, датчики магнитного поля, магнитные многослойные структуры.

Развитие техники накладывает все более жесткие требования на параметры и условия работы измерительных преобразователей датчиков внешних воздействий, которые должны обладать хорошими метрологическими характеристиками и иметь высокую надежность [1]. Поиск материалов для преобразователей, удовлетворяющих этим требованиям, заставляет обратить внимание на среды с эффектом магнитного импеданса (МИ) [2]. МИ – это изменение комплексного сопротивления ферромагнитного проводника при изменении магнитного поля [1]. Очень высокая чувствительность МИ делает данный эффект перспективным для детектирования очень малых магнитных полей [3]. Наибольший интерес для технических и биомедицинских приложений представляют собой пленочные структуры, лучше всего адаптированные к существующим технологиям и геометриям биодетектирования. Многие особенности геометрии МИ структур обсуждались в научной литературе

---

© Членова А. А., Курляндская Г. В., Волчков С. О.,  
Лепаловский В. Н., Свалов А. В., 2015

в последние годы [4–5]. Было высказано предположение о возможных преимуществах «несимметричных» структур (рис. 1), но решению проблемы детектирования с помощью «несимметричных» пленочных структур препятствует отсутствие систематических исследований особенностей магнитных свойств, эффективной магнитной анизотропии и МИ «симметричных» структур с различной толщиной магнитных суб-слоев FeNi (рис. 1). Необходимость наноструктурирования в случае FeNi, т. е. разбиения толстого слоя FeNi на суб-слои с помощью прослоек связана с переходом толстых слоев FeNi в «закритическое» состояние [6].

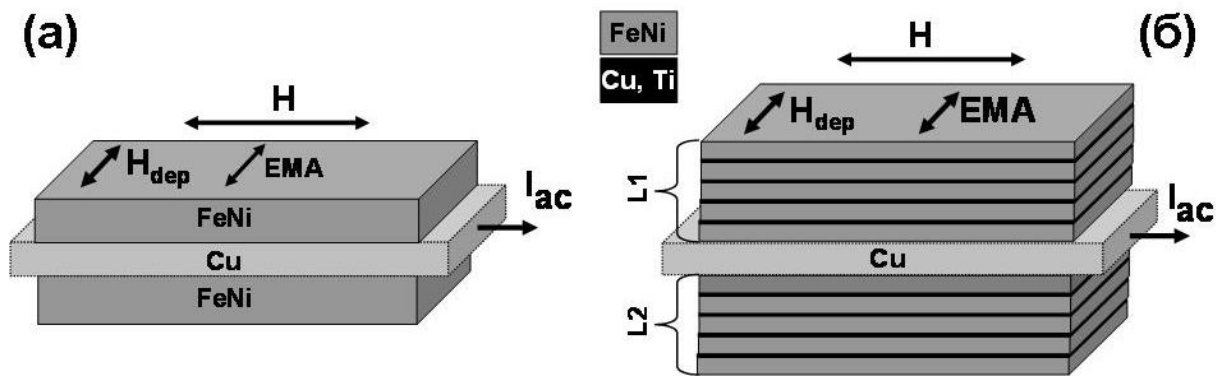


Рис. 1. Простейшая симметричная МИ пленочная структура FeNi/Cu/FeNi без наноструктурирования – а. Симметричная МИ пленочная структура типа  $[\text{FeNi/Cu}]_x/\text{Cu}/[\text{FeNi/Cu}]_x$  (случай  $L1 = L2$ ), полученная с использованием наноструктурирования – б. Для «несимметричных» структур  $L1 \neq L2$ . Ориентация оси лёгкого намагничивания (ЕМА) задавалась магнитным полем в 100 Э ( $H_{\text{dep}}$ ), приложенным во время напыления образцов.  $H$  – внешнее магнитное поле, прикладываемое во время МИ измерений

В данной работе исследуются особенности магнитного импеданса плёночных элементов в форме полос со слоистой структурой  $[\text{FeNi/Cu}]_x/\text{FeNi/Cu}/[\text{FeNi/Cu}]_x/\text{FeNi}$  и  $[\text{FeNi/Ti}]_x/\text{FeNi/Cu}/[\text{FeNi/Ti}]_x/\text{FeNi}$  при варьировании толщины магнитных субслоев FeNi.

В качестве подложек для плёночных элементов использовали стеклянные пластины. Формирование плёночных структур осуществлялось с помощью

металлических масок при давлении остаточных газов в рабочей камере –  $10^{-6}$  мм рт.ст. и давлении аргона –  $10^{-3}$  мм рт.ст. Магнитные свойства пленочных образцов измерялись с помощью вибромагнитометра. На основе анализа петель гистерезиса установлено наличие в плоскости плёнок одноосной магнитной анизотропии с низкой дисперсией осей легкого намагничивания. Активное сопротивление элементов на постоянном токе ( $R_{dc}$ ) измерялось двухконтактным методом с помощью мультиметра HP Agilent 3440 при силе тока 10 мА. Импеданс измерялся в линии «микрострейп» на анализаторе импеданса Agilent HP e4991A с погрешностью не более 1 %. Амплитуда тока возбуждения составляла 10 мА для всех измерений в диапазоне частот от 1 до 300 МГц. Внешнее квазистатическое магнитное поле  $H$  напряженностью от +100 до –100 Э создавалось соленоидом и прикладывалось вдоль длинной стороны пленочных образцов в виде полос (продольный магнитный импеданс импеданс). Все измерения проводились при комнатной температуре. Для характеристики эффекта магнитного импеданса использовались зависимости модуля полного электросопротивления,  $Z$ , или его действительной части,  $R$ , а также МИ отношения, т. е. относительные величины  $\Delta Z/Z$  и  $\Delta R/R$  от напряжённости внешнего магнитного поля  $H$ , рассчитанные следующим образом:  $\Delta Z/Z = 100 \times (Z(H) - Z(H_{max})) / Z(H_{max})$ ,  $\Delta R/R = 100 \times (R(H) - R(H_{max})) / R(H_{max})$ ,  $H_{max} = 100$  Э. Восходящие ветви МИ кривых обозначались «up», а нисходящие – «down». Чувствительность к внешнему полю определялась из соотношения:  $S(\Delta Z/Z) = \delta(\Delta Z/Z) / \delta H$ , где  $\delta H = 1$  Э.

На рис. 2 показаны полевые зависимости полного импеданса и  $\Delta Z/Z$  отношения для симметричных МИ структур  $0,5 \times 10$  (мм) с прослойками Cu, общая толщина магнитных слоев которых (верхнего и нижнего) составляла примерно 500 нм, совпадая с толщиной центрального токовода: [FeNi(170 нм)/Cu(3 нм)]<sub>2</sub>FeNi(170 нм)/Cu(500 нм)/[FeNi(170 нм)/Cu(3 нм)]<sub>2</sub>FeNi(170 нм) и [FeNi(25 нм)/Cu(3 нм)]<sub>19</sub>FeNi(25 нм)/Cu(500 нм)/[FeNi(25 нм)/Cu(3 нм)]<sub>19</sub>FeNi(25 нм). Для первой структуры наибольшая чувствительность составляла

$S(\Delta Z/Z) = 12 \text{ \% Ое}$  в интервале рабочих полей  $\Delta H = 3,3 \text{ Э}$ , центр которого соответствовал полю  $H_{WP} = 5,5 \text{ Э}$  (рабочая точка). Для второй структуры наибольшая чувствительность составляла  $S(\Delta Z/Z) = 37 \text{ \% Ое}$  в несколько менее широком интервале рабочих полей  $\Delta H = 2,1 \text{ Э}$ , центр при  $H_{WP} = 3,3 \text{ Э}$ . Таким образом, толщина субслоев FeNi играет очень важную роль в формировании МИ отклика симметричных пленочных МИ структур.

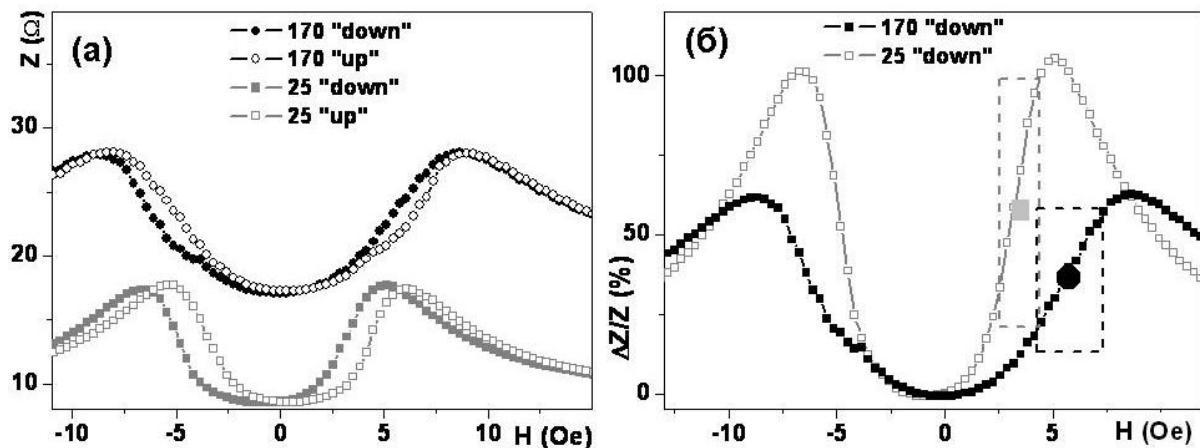


Рис.2.

Рис. 2. Полевые зависимости полного импеданса – а;  $\Delta Z/Z$  (б) для симметричных структур с толщинами суб-слоев FeNi 170 и 25 нм, измеренные на частотах максимума МИ (110 и 140 МГц соответственно). Рабочие интервалы, для которых наблюдалась линейная зависимость  $\Delta Z/Z$  от  $H$  – б

На рис. 3 показаны петли гистерезиса и частотные зависимости максимальных МИ отношений для полного импеданса  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  и его действительной части  $(\Delta R/R)_{\max}$  для симметричных МИ структур  $0,5 \times 10$  (мм) с прослойками титана:  $[\text{FeNi}(100 \text{ нм})/\text{Ti}]_3/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{FeNi}(100 \text{ нм})/\text{Ti}]_3$  и  $[\text{FeNi}(150 \text{ нм})/\text{Ti}]_2/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{FeNi}(150 \text{ нм})/\text{Ti}]_2$ . Для первой структуры наибольшая величина  $\Delta Z/Z = 140 \text{ \%}$  наблюдалась на частоте тока возбуждения  $f = 130 \text{ МГц}$  (при максимальной чувствительности  $S(\Delta Z/Z) = 60 \text{ \%}/\text{Э}$ ,  $H_{WP} = 2,2 \text{ Э}$ ), а для второй  $\Delta Z/Z = 170 \text{ \%}$  наблюдалась на частоте тока возбуждения  $f = 50 \text{ МГц}$  (при максимальной чувствительности  $S(\Delta Z/Z) = 85 \text{ \%}/\text{Э}$   $H_{WP} = 1,9 \text{ Э}$ ). Таким образом, и в случае прослоек Ti толщина субслоев FeNi также играет важную роль.

В данном исследовании было установлено, что толщина субслоев FeNi играет важную роль в формировании МИ отклика симметричных пленочных структур на основе FeNi/Cu и FeNi/Ti слоев. Хотя дополнительные исследования необходимы для уточнения физического механизма этого влияния, в качестве предположения можно рассматривать такие параметры, как особенности межслойного взаимодействия и четность/нечетность числа структурных элементов.

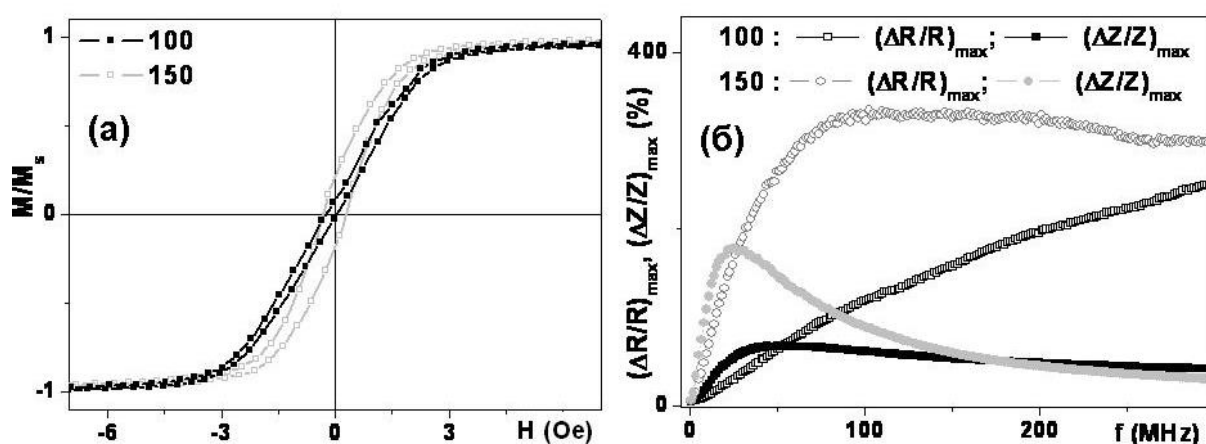


Рис. 3. Петли гистерезиса – а и – б частотные зависимости максимальных МИ отношений  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  и  $(\Delta R/R)_{\max}$  для структур с нечетным  $[\text{FeNi/Ti}]_3/\text{Cu}/[\text{FeNi/Ti}]_3$  и четным числом слоев  $[\text{FeNi/Ti}]_2/\text{Cu}/[\text{FeNi/Ti}]_2$

## Литература

1. G. V. Kurlyandskaya, D. de Cos, S. O. Volchkov // Russ. J. of Nondestr. Test. Vol. 45. P. 377–398.
2. Антонов А. С., Гадецкий С. Н., Грановский А. В., Дьячков А. Л., Парамонов В. П., Перов Н. С., Прокошин А. Ф., Усов Н. А., Лагарьков А. Н. // ФММ. 1997. Т. 83. № 6. С. 61–71 .
3. Beach R. S. and Berkowitz A. E. // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. P. 6209–6213.

4. Volchkov S. O., Fernández E., Garcia-Arribas A., Barandiaran J. M., Lepalovskij V. N., Kurlyandskaya G. V. // IEEE Trans. Magn. 2011. Vol. 47. № 10. P. 3328–3331.
5. Chlenova A. A., Kurlyandskaya G. V., Volchkov S. O., Lepalovskij V. N., Kammouni R. El // Sol. State Phen. 2014. Vol. 215. P. 342–347.
6. Kurlyandskaya G. V., Elbaile L., Alves F., Ahamada B., Barrue R., Svalov A. V., Vas'kovskiy V. O. // J. Phys.: Condens. Matter. 2004. Vol. 16. P. 6561–6568.